

護岸係留された浮体構造物を対象とした動揺解析手法の効率化

小俣 哲平^{*1}・織田 幸伸^{*1}・橋本 貴之^{*1}・本田 隆英^{*1}

Keywords : floating structure, mooring, motion analysys, mirrir model, reflection

浮体構造物, 係留, 動揺解析, 鏡像モデル, 反射

1. はじめに

護岸係留された浮体の動揺や作用波力の検討では、護岸での反射を考慮する必要がある。これを数値解析する方法として護岸を構造物として直接モデル化する方法が考えられるが、その場合十分長い護岸延長を考慮する必要があり、解析負荷が大きくなる。そのため、護岸係留された浮体を対象とした解析コードでは、護岸モデルを必要としない鏡像モデルを用いるのが一般的である。これは、護岸に対し、解析対象浮体と対称な形状、運動をする仮想のモデルを同時に解析することで、護岸による波の反射を考慮する解析手法である。護岸係留された浮体に関しては多くの既往研究があり^{1)~5)}、例えば増田ら⁴⁾は、岸壁に鏡像の原理を適用した3次元特異点分布法を用いて浮体の動揺特性について検討しており、離岸距離が大きい場合には、入射波の半波長程度の周期に応じた応答の変動があることなどを明らかとしている。

洋上風力発電施設に代表されるような沖合の浮体構造物の場合、護岸付近での施工を伴うため、前述したような護岸付近での動揺解析が必要となる。しかし、護岸付近での係留浮体を対象とした汎用的な解析コードはほとんどない。さらに、沖合での浮体動揺を対象とした汎用的な解析コードでは、鏡像モデルを考慮できる機能を登載していないことが一般的である。そこで本研究では、沖合での浮体動揺を対象とした汎用的な解析コードを用いて、護岸係留された浮体の動揺を解析できる手法について検討した。なお、本検討では、沖合での浮体動揺を対象とした解析コードに対し、対称な2つの浮体構造物を考慮することで、鏡像モデルに相当する解析手法を適用した。その解析結果を水理模型実験の結果や護岸を直接モデル化する手法による

解析結果と比較することで、鏡像モデルの妥当性について検討した。

2. 水理模型実験

2.1 実験模型

解析モデルの有効性の検証に先立ち、水理模型実験により検証用データを取得した。水理模型実験に使用した模型概要及び諸元を図-1に示す。浮体模型として、バージ型模型（幅0.9m、長さ0.9m、高さ0.2m）と、4本の円筒（カラム）から構成される洋上風力発電施設基礎のセミサブ型模型（センターカラム径0.3m、サイドカラム径0.35m、高さ0.71m）の2種類を、縮尺1/50を想定して製作した。セミサブ型浮体のサイドカラム底盤には、直径0.5mのヒーププレートと呼ばれる上下の動揺を抑制するための水平板が付いている。喫水は、バージ型浮体は0.1m、セミサブ型浮体は0.2mとなるように調整した。護岸模型は作用波が越流しない十分な高さとした。

2.2 実験方法

実験は平面水槽で実施し、水深は実機スケールで15mを想定した0.3mとした。浮体を護岸前面に配置し、規則波を作成させた。波高は0.02mで共通とし、周期

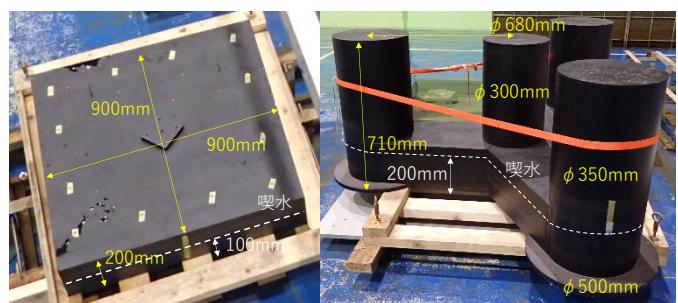


図-1 実験模型と諸元（左：バージ型、右：セミサブ型）
Fig.1 Experimental models (left : burge type, right : semi-sub type)

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 水理研究室

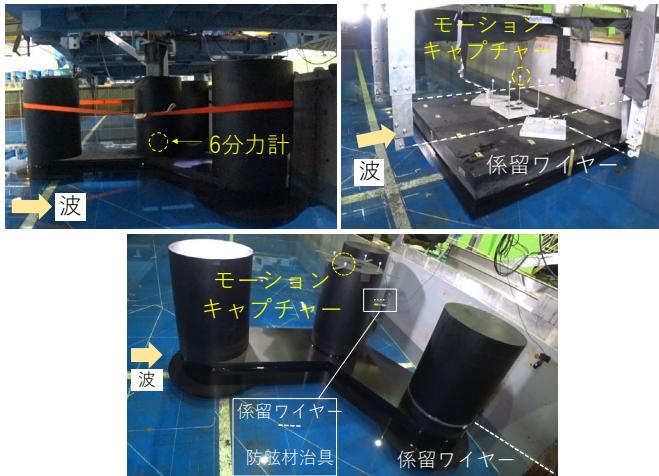


図-2 実験概要（左上：固定実験、右上：バージ動揺実験、下：セミサブ動揺実験）

Fig.2 Experiment overviews (upper left: fixed experiment, right: moored barge experiment, lower: moored semi-sub experiment)

を 0.7 s～2.0 s の間で変化させた 5 種類の波を設定し、波向きは 0°, 45° 方向の 2 ケースを設定した。バージ型浮体については、護岸との離隔距離が 0.1 m, 0.2 m の 2 ケースを設定した。また実験に先立ち、浮体と護岸がない状態で、浮体中央位置での通過波を計測した。

実験は、浮体を固定した固定実験とワイヤーとバネで係留した動揺実験の 2 種類を実施した。固定実験及び動揺実験の状況を図-2 に示す。固定実験では、バージ型浮体及びセミサブ型浮体を対象に、浮体に取り付けた 6 分力計を介して浮体を固定し、浮体に作用する 6 自由度方向の流体力を計測した。バージ型浮体の動揺実験では、図-2 に示すようにバージ型浮体を 6 本のワイヤーと柔らかい線形ばねで係留した状態で波を作用させた。ワイヤー端部に設置されたロードセルで係留張力を計測し、浮体中央部に設置したターゲットをモーションキャプチャーで撮影することで、浮体重心の 6 自由度方向の動揺量を計測した。セミサブ型浮体の動揺実験では、図-2 に示すように 4 本のワイヤーと線形ばねを用いて、護岸に押し当てる形で緊張係留された状態で実験した。なお、護岸と浮体間は、防舷材を模擬したスポンジ素材の緩衝材付きの鋼棒を接触させ、その圧縮力を計測した。

3. 鏡像モデルの解析条件

数値解析は模型スケールで実施し、動揺解析には汎用的な動揺解析ソフトである OrcaWave, OrcaFlex を用いた。OrcaWave は浮体に作用する流体力係数を算定するポテンシャル解析ソフトウェアであり、OrcaFlex は

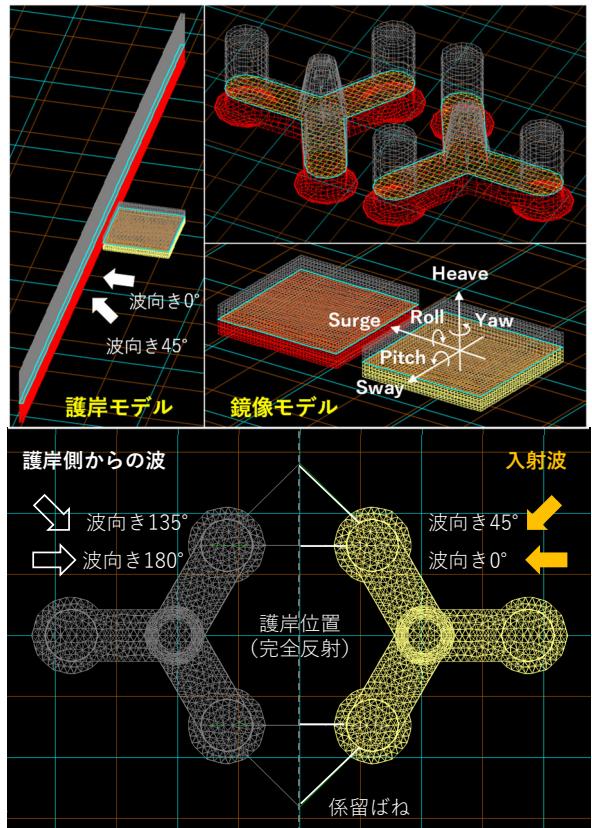


図-3 解析モデル（上：固定実験、下：動揺実験）

Fig.3 Numerical calculation models (upper : fixed experiment, lower : moored experiment)

非線形の係留力等を考慮した時系列動揺解析が可能なソフトウェアである。解析に使用した鏡像モデル及び護岸を構造物としてモデル化したモデル（以下護岸モデルと称す）を図-3 に示す。同図には、波向きと、浮体の 6 自由度の動揺の定義も併記した。ここで 6 自由度の動揺とは、水平鉛直方向の並進運動である surge (前後揺れ), sway (左右揺れ), heave (上下揺れ) と、それぞれの軸方向に対する回転運動である roll (横揺れ), pitch (縦揺れ), yaw (船首揺れ) である。鏡像モデルによる解析では、護岸位置に対し、対称な 2 つの浮体構造物がそれぞれ独立して動揺するマルチボディを考慮することで、鏡像モデルに相当する解析手法を適用した。鏡像の条件として、図-3 に示すように入射波に対し護岸での完全反射を仮定した波を護岸側からも同時に入射させた（波向き 0° の入射波に対しては波向き 180° の波を、波向き 45° の入射波に対しては波向き 135° の波を同時入射した）。これにより、護岸での波の反射を再現することになり、また無限延長の護岸を仮定したことになる。解析では、護岸モデルと鏡像モデルの比較の他、護岸モデルにおける護岸延長、護岸と浮体の離隔をパラメータとした数値実験も実施した。係留実験の再現解析では、係留ワイヤー

を線形ばねのみでモデル化し、その他の外力である抗力（水の流速に応じた抵抗力）や漂流力を含まない線形解析を適用した。OrcaFlex の計算時間は、浮体の動揺が定常状態となる時間として、400秒程度としたが、計算開始時は 100 秒掛けて設定波高へ増幅する設定とした。

4. 数値実験によるモデルの特性確認

4.1 護岸延長の影響

護岸モデルにおける護岸の延長が浮体作用波力へ及ぼす影響を確認するため、護岸モデルによる解析と鏡像モデルによる解析を比較する数値実験を、OrcaWave を用いて実施した。図-4 に波向き 0° の、護岸なし（浮体単体）、護岸あり（護岸延長 9 m, 18 m）、鏡像モデルでの、浮体に働く Surge, Heave 方向の LoadRAO の解析結果を示す。なお、RAO は単位波高当たりの応答を表しており、LoadRAO は周期毎の浮体に作用する波力を単位波高あたりに換算した値となる。護岸と浮体との離隔距離は 0.1 m である。OrcaWave では、 0° から 360° までの各波向き方向（今回の解析では 22.5° おき）および各周期成分（今回の解析では 0.3 s～5.0 s）に対する、単位波高あたりの波力と、波に対する波力の位相差が出力される。図-4 に示した LoadRAO は、OrcaWave の片方の浮体（図-3 中黄色のモデル）の解析における、波向き 0° 方向の解析結果と 180° 方向の解析結果を、反射波に対する波力の位相を考慮し合成することで算出した結果である。同図より、浮体単体と比較すると、鏡像モデル、護岸モデルとともに、Surge 方向の周期 1 s～2 s, Heave 方向の 2 秒以上で、浮体に作用する波力が大きくなっている。また護岸 9m, 18m のケースでは、周期に対する応答に規則的な変動が見られ、特に護岸延長が長いケースほど短い周期間隔の変動となっている。一方、無限長の護岸に相当する鏡像モデルでは、上記のような変動は発生していない。また、規則波の周期が長くなるに従い、変動の度合いは小さくなっています、十分に周期が長ければ鏡像モデルの結果に一致すると推察される。有限長の護岸モデルで解析を行う場合には、上記の影響に留意する必要がある。

ここで、Heave 方向の結果に示す山谷の 4～5 点（図中○△）の周期について、護岸前面での圧力 RAO（圧力変動の振幅値を単位波高あたりに換算した値）の空間分布を算出した結果を図-5 に示す。図中には、対象としたバージ型浮体（幅 0.9 m）の範囲も示した。圧力

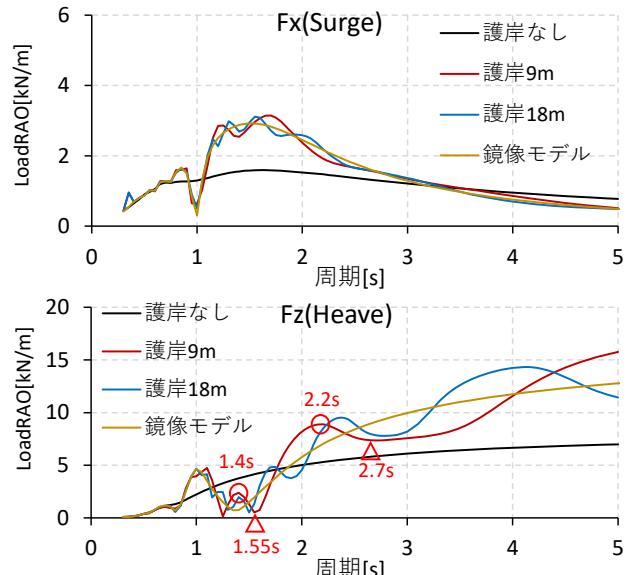


図-4 護岸影響の数値実験（護岸との離隔 0.1 m）

Fig.4 Numerical experiment for influence of seawall
(gap distance from seawall : 0.1 m)

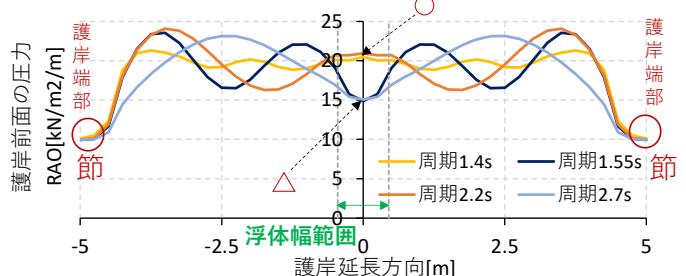


図-5 護岸前面延長方向の圧力 RAO（護岸 9 m）

Fig.5 Pressure RAO along seawall front (seawall length of 9 m)

RAO の分布は護岸中央（0 m 位置）に対し対称に分布しており、延長方向に分布の変動が見られる。線形解析の場合、圧力は水位に相当するため、同図より、Heave 方向の LoadRAO の変動の山となる時（図中○）は、護岸中央の水位変動が大きく、谷となる時（図中△）は水位変動が小さくなっていることが分かる。なお、護岸延長 9 m の分布は、護岸端部（ ± 0.45 m 位置）において、圧力 RAO が急激に減少することから、波高の空間分布の節となっていると推察される。図-4 で護岸 9 m のケースに示した変動の谷となる周期である 1.55 s, 2.7 s の波の波長は、それぞれ 2.43 m, 4.5 m であり、その概ね 4 倍、2 倍が護岸の長さとなっている。一方、変動の山となる周期である 1.4 s, 2.2 s の波の波長は、それぞれ 2.15 m, 3.61 m であり、概ね 5 倍、3 倍となっている。これらのことから、図-4 中の護岸モデルの Heave の結果に見られた LoadRAO の変動は、護岸延長に応じたモードの定在波が発達したことが要因と考えられる。定在波とは、見かけ上波が進行せず、水位変動が同じ場所で繰り返されているような形態の波である。ただし、この定在波の浮体への影響は浮体と護岸

との離岸距離に依存し、離岸距離が大きいほど影響は小さいと考えられる。

4.2 離隔距離の影響

図-6に、鏡像モデルにおいて、護岸と浮体の離隔を変更した数値実験による作用波力の結果を Surge について示す。護岸離隔はバージの長さ B (0.9 m) に対する比率で示した。同図より、作用波の周期に対し波力が規則的に変動しており、離隔距離に応じて RAO の変動特性が変わっていることが分かる。これは、護岸と浮体間に存在する入反射波の重ね合わせによる波高変化、回折波、および多重反射の影響と考えられる。その変動の周期間隔は離隔距離が長いほど短くなっている。離岸距離が大きくなった場合、比較的短周期の波でも周期により波力が大きく変動する可能性があることが示唆される。ただし不規則波では、複数の周期の重ね合わせとなるため、このような顕著な波力の増減は生じないと考えられる。護岸に係留された浮体構造物の設計において、規則波に代表させた解析を実施する場合には、注意を要する。

5. 鏡像モデルによる水理実験の再現解析

5.1 固定実験の再現解析

上述したように、護岸モデルに対する鏡像モデルの優位性が確認できたことから、浮体に作用する流体力について、鏡像モデルを用いた解析結果と実験結果を比較した。

図-7はバージ型浮体について、護岸との離隔 0.2 m、波向き 0° 及び 45° のケースの鏡像モデルによる解析結果と実験結果のうち、Surge, Heave, Pitch 方向の LoadRAO を示したものである。同図より、解析結果は両波向きとも実験結果を良好に再現している。Surge, Pitch の周期 1.4 s から 1.7 s において、解析結果が過小評価となっているが、線形解析では考慮していない抗力等の非線形な力の影響と考えられる。また、実験及び解析の結果から、波向き 0° と波向き 45° でそれぞれの Surge と Pitch の応答傾向は類似しており、運動していることが分かる。これは、Surge と Pitch 方向の波力は、ともに浮体の前面（沖側）と背面（護岸側）の水位差が大きく、すなわち圧力差が大きくなる場合に波力が大きくなるためと考えられる。一方で、Heave 方向の LoadRAO については、同周期の波に対して、Surge と Pitch の応答が小さい時に Heave の応答は大きく、Surge と Pitch の応答が大きい時に Heave の応答は小さくなっている。これは、浮体の前面（沖側）と背

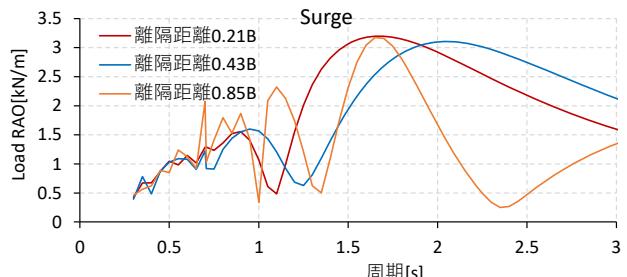


図-6 護岸との離隔を変更した数値実験 (Surge)

Fig.6 Numerical experiments with different gap distances from the seawall (Surge)

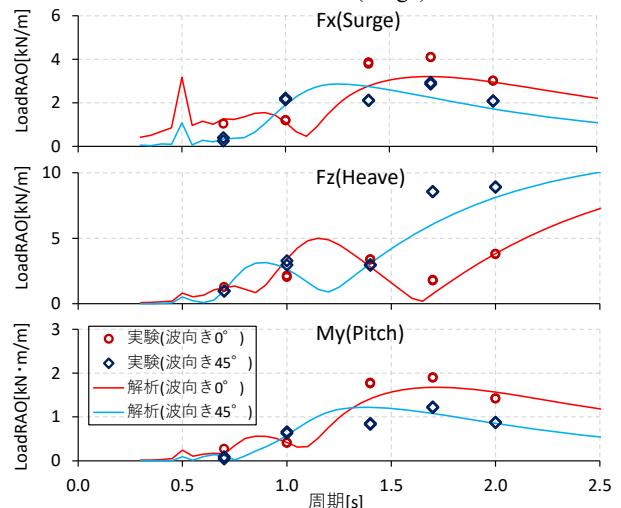


図-7 バージ型浮体の実験と解析の RAO 比較(固定実験)

Fig.7 Comparison of RAO of experiments and calculations of barge type float (fixed experiment)

面（護岸側）の水位がともに高くその水位差すなわち圧力差が小さい時に、Heave 方向の LoadRAO は大きくなるためであり、その結果、Heave 方向の応答は Surge と Pitch の応答と逆の傾向となったと考えられる。また、Surge, Heave, Pitch 方向の LoadRAO において、周期 0.5 s に大きな応答が見られる。これは、水深 0.3 m における周期 0.5 s の波の波長は約 0.39 m であり、その半波長が離岸距離 0.2 m と一致することから、バージ型浮体と護岸との間で波が共振するスロッシング現象が生じたためと考えられる。さらに、波向き 0° と波向き 45° の結果を比較すると、LoadRAO の応答傾向が変化している。例えば、Surge 方向の LoadRAO について、波向き 0° では周期 0.9 s 付近に生じていた応答のピークが、波向き 45° では、周期 1.2 s 付近で生じている。この傾向は Heave, Pitch でも同様であり、波向き 45° の応答のピーク発生周期は、波向き 0° と比較して、長周期側に移動していることが分かる。これは、波の作用方向が変わると、護岸直角方向の波の見掛けの波長が変化し、浮体の前面背面位置と浮体に作用する定在波の腹節の位置関係が変化するためと考えられる。

図-8 はセミサブ浮体に作用する波力の LoadRAO の結

果である。セミサブ浮体においても、鏡像モデルによる解析は実験結果を概ね良好に再現している。ただし、特に短周期の場合に Pitch 方向の LoadRAO が過少評価となっている。本解析では抗力を考慮していないが、カラム底面のヒーププレートに働く抗力は、短周期においては波長がセミサブ延長に対して短くなることで、各カラムで位相差を持って働くため、回転モーメントとして作用し、Heave 方向では打ち消し合うためとして小さくなっていると考えられる。また、実験と解析の結果から、セミサブ浮体においても、波向きが 45° の方向のケースでは LoadRAO のピークが長周期側へ移動することが確認された。

5.2 バージ型浮体動揺実験の再現解析

図-9 はバージ型浮体の係留時の浮体重心の DisplacementRAO について、鏡像モデルを用いた解析結果と実験結果を比較した結果である。波向き 0° の結果を示した。ここで DisplacementRAO は、浮体動揺量の振幅値を入射波高で除した値を周期応答として示したものである。Heave, Pitch 方向の解析結果は実験結果を良好に再現している。ただし、Pitch の固有周期に近い周期 1.4 s では両者の差異が大きい。これは、図-7 中の pitch の結果で示したように、浮体に作用する波力が解析において過少評価になっているためと考えられる。図-10 は、図-9 中の周期 1.7 s のケースについて、バージ型浮体の実験と解析の時系列を、Pitch 動揺及び係留索張力について比較した図である。実験と再現解析の間で、位相のずれが生じているものの、Pitch や係留張力については良好に再現できている。

5.3 セミサブ型浮体動揺実験の再現解析

図-11 は、セミサブ型浮体の係留時の浮体重心の動揺量の DisplacementRAO について、鏡像モデルを用いた解析結果と実験結果を比較したものである。波向き 0° の結果を示した。なおここでは、ヒーププレートの鉛直方向にのみ抗力の作用を設定した。同図より、Surge, Heave, Pitch 方向の DisplacementRAO が、それぞれ良好に再現できていることが分かる。護岸に緊張係留された場合、セミサブ型浮体は Surge, Pitch 動揺とともに周期が長くなるに従い、動揺量が大きくなることが確認された。ただし、Surge の結果において、周期 1.4 秒の解析結果が実験結果よりも過大となっている。解析結果より、浮体の Surge 方向の動揺において大きな振幅が発生する周期は 5.6s 程度であった。また、Sway 方向の同じ周期で動揺していたことから、Surge 方向の大きな動揺は Sway 方向の動揺に起因するものであると考えられる。Sway 方向の固有周期が、波の周期 1.4s の

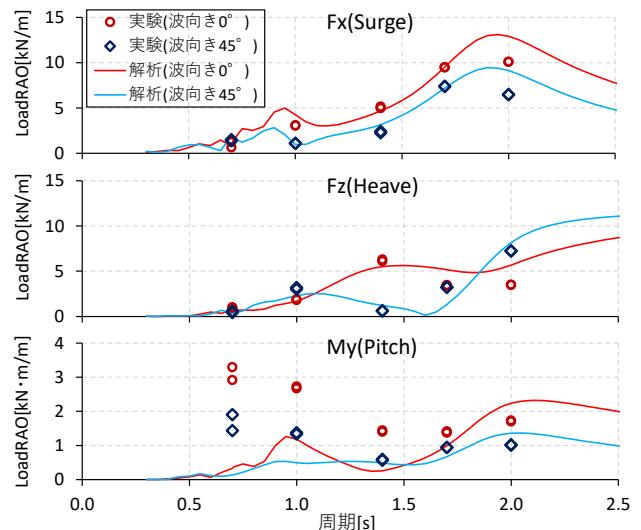


図-8 セミサブ型浮体の実験と解析の RAO 比較(固定実験)

Fig.8 Comparison of RAO of experiments and calculations of semi-sub float (fixed experiment)

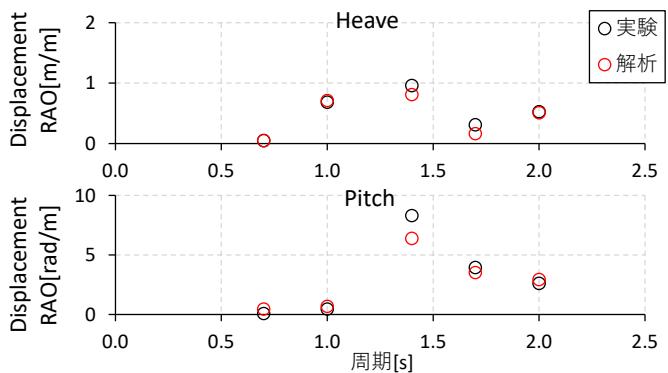


図-9 バージ型浮体の実験と解析の DisplacementRAO 比較

Fig.9 Comparison of DisplacementRAO of experiments and calculations of barge type float

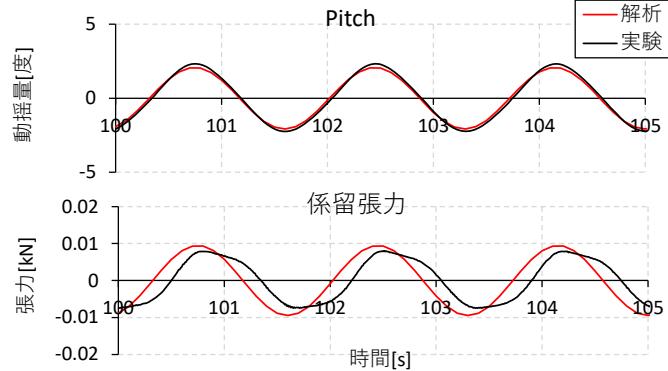


図-10 バージ型浮体の実験と解析の時系列比較($T=1.7$ s)

Fig.10 Comparison of time series of experiments and calculations for barge type float ($T=1.7$ s)

4 倍となっていたため、Sway 方向の動揺が大きくなつたと考えられる。今回の解析では、防舷材治具をばね係留でモデル化しているが、Sway 方向の固定はしていないため、浮体が Sway 方向に変位すると、ばねも Surge 方向から Sway 方向へ傾く。Sway 方向の変位が戻る際のばねの圧縮率が大きいため、Surge 方向の動揺が

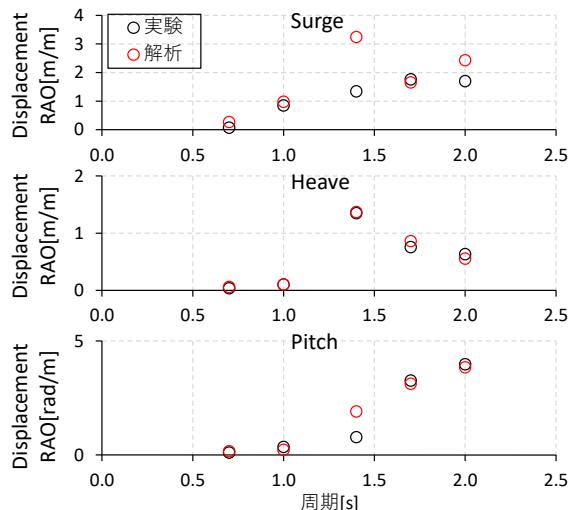


図-11 セミサブ型浮体の実験と解析の DisplacementRAO 比較
Fig.11 Comparison of displacementRAO of experiments and calculations for semi-sub float

大きくなつたと考えられる。一方で実験は防舷材反力は Surge 方向にしか作用せず、Sway 方向の動搖の影響を受けないため、解析と実験で差が生じたと考えられる。図-12 に、図-11 中の周期 1.7 s のケースについて、セミサブ型浮体の実験と解析の時系列結果を示す。振幅は概ね再現出来ているが、Surge 動搖については、特にプラス側で、変動の波形が実験結果の方が尖鋭化している。また、変位は護岸側をプラス、沖側をマイナスと定義しているが、沖側の変動の方が大きく、波形はなだらかなであることが分かる。今回の実験では、浮体を護岸に押し合てるように緊張係留しているため、Surge 方向の護岸側への変位は、防舷材を模擬した緩衝材付きの鋼棒によって制限されるとともに、沖側へ反発し押し戻されるためと推察される。加えて、緩衝材はスポンジ素材であるため、剛性は非線形であるとともに圧縮方向と引張方向で異なつていると考えられる。以上の理由により、特に護岸方向の防舷材衝突時変動特性の再現性が低いと考えられる。解析において、この防舷材部のモデル化が適切でないと考えられるため、防舷材部のダンパー効果の解析条件の見直し等を行い、解析精度の向上を図る予定である。

6. おわりに

護岸係留された浮体の動搖解析において、護岸モデルと鏡像モデルを用いた場合の特性について比較検証し、また、鏡像モデルによる実験結果の再現解析を実施した。その結果、以下のような知見が得られた。

- 浮体単体に比べて、護岸モデル及び鏡像モデルと

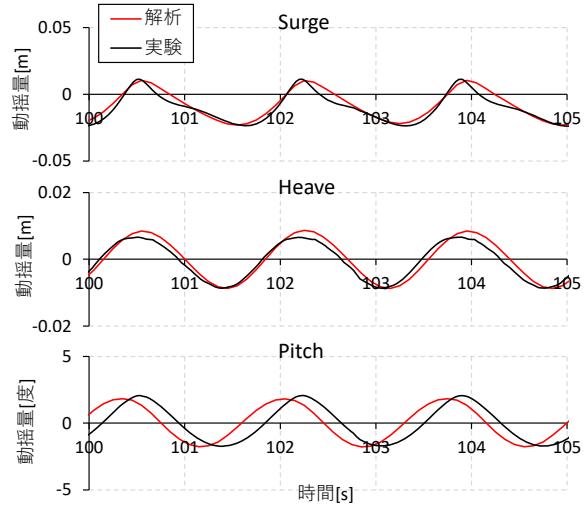


図-12 セミサブ型浮体の実験と解析の時系列比較 (T=1.7 s)
Fig.12 Comparison of time series of experiments and calculations for semi-sub float (T=1.7 s)

もに護岸からの反射波の存在より、浮体に作用する波力が変化することが確認された。

- 護岸を直接モデル化する解析では、護岸延長に応じたモードの定在波が発達し、浮体への作用波力に影響を及ぼすことが確認された。
- 無限長の護岸に相当する鏡像モデルでは、そのような変動は発生せず、鏡像モデルの優位性が確認された。
- 鏡像モデルを用いて実施した実験結果の再現解析は、バージ型浮体、セミサブ型浮体とともに実験結果を概ね良好に再現し、鏡像モデルの有効性が確認された。
- 今後は、浮体に働く抗力や漂流力といった非線形力の影響を考慮し、解析精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 清川哲志、平山彰彦：任意反射率岸壁前面の船体動搖特性、海岸工学講演会論文集、31巻、pp.476-480、1984..
- 清川哲志、平山彰彦：岸壁前面の浮体動搖解析における3次元性の影響、海岸工学講演会論文集、33巻、pp.546-550、1986.
- 久保正義、斎藤勝彦：岸壁前面に任意の角度で係留された浮体式係船岸の動搖特性の計算、日本航海学会論文集、84巻、pp.75-84、1991.
- 増田光一、大澤弘敬、片山昌太郎：岸壁に直接係留された浮体の動搖特性と係留力及び荷役稼働に関する研究、海岸工学論文集、43巻、pp.986-990、1996.
- 増田光一、大澤弘敬：沿岸域における緩和型浮体式海洋建築物係留物の動きと係留索の張力の予測手法に関する研究（第2報）、構造工学論文集（日本建築学会論文誌）、43巻、pp.193-202、1995.